

О СТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СМЕСЕЙ

Н. Х. Магеррамов, А. Х. Мирзаджанзаде, В. И. Мотляков,
В. В. Мустафаев

(Баку)

Исследование стационарной фильтрации газоконденсатных смесей представляет интерес в ряде случаев, в частности для обработки результатов исследования скважин. В литературе обработка результатов исследования газоконденсатных скважин проводится аналогично газовым.

В работе [1] задача о стационарной фильтрации газоконденсатной смеси для случая, когда жидкая фаза также является подвижной, приводится к задаче о фильтрации однородной несжимаемой жидкости при помощи функции

$$H = \int_0^p k_1(s) \rho dp \quad (1)$$

Здесь $k_1(s)$ — относительная фазовая проницаемость для газа, ρ — плотность газа. Объемные расходы газовой фазы Q_1 и жидкой фазы Q_2 газоконденсатной смеси (полагая, что фильтрация каждой из фаз происходит по линейному закону фильтрации) определяются выражениями

$$Q_1 = - \frac{k_1(s) F}{\mu_1} \frac{dp}{dL} \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

$$Q_2 = - \frac{k_2(s) F}{\mu_2} \frac{dp}{dL} + Q_1 A (p - p_2) \quad \left(A = \frac{V_0}{p_1 - p_2} \right) \quad (3)$$

Здесь $k_2(s)$ — относительная фазовая проницаемость для жидкости, s — насыщенность жидкостью (конденсатом) порового пространства, μ_1, μ_2 — соответственно вязкости газа и жидкости, F — площадь нормального к направлению L сечения пласта, p_2 — давление максимальной конденсации, V_0 — максимальный удельный объем конденсата, p_1 — давление начала конденсации. Газоконденсатный фактор $\Gamma = Q_1 / Q_2$ в условиях установившейся фильтрации постоянен. Разделив (2) на (3), имеем

$$\Gamma = \left[\frac{k_2(s) \mu_1 p_0}{k_1(s) \mu_2 p} + A (p - p_2) \right]^{-1} = \text{const} \quad (4)$$

Для оценки влияния выпадения конденсата на характер индикаторной диаграммы в первом приближении примем

$$k_1(s) = a_1 + b_1 s, \quad k_2(s) = a_2 + b_2 s \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) получим уравнение

$$s = \frac{A a_1 p^2 - a_1 (A p_2 + \Gamma^{-1}) p + a_2 b p_0}{-A b_1 p^2 + b_1 (A p_2 + \Gamma^{-1}) p - b_2 b p_0} \quad \left(b = \frac{\mu_1}{\mu_2} \right) \quad (6)$$

Подставим $k_1(s)$ и s согласно (5) и (6) в формулу (1) и внесем вместо плотности ρ ее выражение из уравнения состояния $\rho = \rho_0 p / p_0$ (движение газа в пористой среде рассматривается как изотермический процесс и газ считается идеальным). В результате получим

$$H = \int_0^p (a_1 + b_1 s) \frac{p_0}{p_0} p dp = \frac{p_0}{p_0} \int_0^p \left[a_1 + b_1 \frac{A a_1 p^2 - a_1 (A p_2 + \Gamma^{-1}) p + a_2 b p_0}{-A b_1 p^2 + b_1 (A p_2 + \Gamma^{-1}) p - b_2 b p_0} \right] p dp$$

Отсюда

$$H = \frac{\rho_0 b}{2p_0 A} \frac{(a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1} \ln \left[\frac{Ab_1 p^2 - b_1 (Ap_2 + \Gamma^{-1}) p}{b_2 b p_0} + 1 \right] + \\ + \frac{\rho_0 b}{2Ap_0} (a_1 b_2 - a_2 b_1) \frac{1}{\sqrt{(Ap_2 + \Gamma^{-1})^2 b_1^2 - 4Ab_1 b_2 b p_0}} \times \\ \times \ln \frac{[\sqrt{(Ap_2 + \Gamma^{-1})^2 b_1^2 - 4Ab_1 b_2 b p_0} - (Ap_2 + \Gamma^{-1}) b_1] p + 2b_2 b p_0}{-\sqrt{(Ap_2 + \Gamma^{-1})^2 b_1^2 - 4Ab_1 b_2 b p_0} + (Ap_2 + \Gamma^{-1}) b_1] p + 2b_2 b p_0} \quad (7)$$

Рассмотрим установившуюся плоско-радиальную фильтрацию газоконденсатной смеси к одиночной скважине.

В общем случае область фильтрации будет разделена на две области. В одной с насыщенностью $s \leq 0.2$ будет двигаться чистый газ, в другой с $s \geq 0.2$ газ будет двигаться вместе с жидкостью [1].

Следует отметить, что в области $s \leq 0.2$, строго говоря, стационарная фильтрация не может иметь места. Приводимые ниже расчеты применимы в случаях, когда газоконденсатный фактор больше потенциального газоконденсатного фактора.

Радиус поверхности раздела обозначим через R_1 . При $s = 0.2$ $k_2(s) = 0$. В этом случае выражение (4) примет вид

$$\Gamma = \frac{1}{A(p_3 - p_2)} \quad (8)$$

Здесь p_3 — давление на границе раздела областей.

Следовательно, давление на границе раздела областей при данном газоконденсатном факторе Γ будет

$$p_3 = \frac{1}{A\Gamma} + p_2 \quad (9)$$

Для получения качественных выводов примем, что скважины гидродинамически совершенны как по характеру, так и по степени вскрытия. Весовой расход газа в области $s \geq 0.2$ определится из выражения

$$G_1 = \frac{2\pi kh (H_3 - H_4)}{\mu_1 \ln(R_1/R_0)} g \quad (10)$$

Здесь R_0 — радиус скважины, h — мощность пласта, k — проницаемость пласта, H_3 — функция H на границе раздела областей, H_4 — функция H на забое скважины.

Весовой расход газа в области $s \leq 0.2$ определится из выражения

$$G_1 = \frac{\pi kh \gamma_0 (p_1^2 - p_3^2)}{\mu_1 p_0 \ln(R_2/R_1)} \quad (11)$$

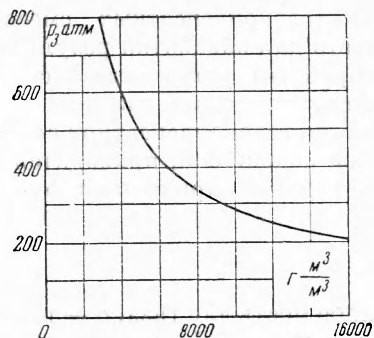
Здесь R_2 — радиус влияния скважины, p_1 — давление на R_2 .

Приравняв (10) и (11) и решая уравнение относительно R_1 , имеем

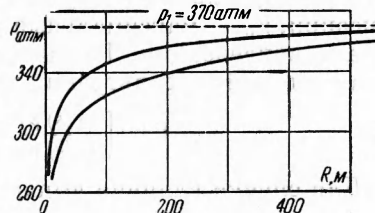
$$R_1 = R_0 \left(\frac{R_2}{R_0} \right)^{\frac{1}{\chi}} \left(\chi = \frac{\gamma_0 (p_1^2 - p_3^2)}{2g p_0 (H_3 - H_4)} + 1 \right) \quad (12)$$

Расчет дебита при установившейся плоско-радиальной фильтрации газоконденсатных смесей к одиночной скважине можно проводить следующим путем.

Сначала по формуле (9) определяется давление p_3 на поверхности раздела областей. Затем по формуле (7) вычисляются H_4 и H_3 . После этого



Фиг. 1



Фиг. 2

по формуле (12) определяется R_1 ; и, наконец, по формуле (10) или (11) определяется дебит скважины. Распределение давления в пласте можно определить следующим образом.

Распределение давления в области движения газа ($s \leq 0.2$) определяется по формуле (см., например, [3])

$$p = \sqrt{p_3^2 + \frac{p_1^2 - p_3^2}{\ln(R_2/R_1)} \ln \frac{R}{R_1}} \quad (13)$$

Выражение для функции H в области совместного движения газа и жидкой фазы ($s \geq 0.2$) имеет вид

$$H = H_4 + \frac{H_3 - H_4}{\ln(R_1/R_0)} \ln \frac{R}{R_0} \quad (14)$$

По формуле (7) можно построить для этой области зависимость функции H от давления p .

Воспользовавшись формулой (14) и графиком, построенным по формуле (7), легко можно определить распределение давления в области совместного движения газа и жидкой фазы.

Для иллюстрации применения изложенных методов при решении задач об установившемся движении газоконденсатных смесей в пористой среде рассмотрим конкретные примеры плоско-радиальной фильтрации газоконденсатной смеси к одиночной скважине.

Определим дебиты скважины, распределение давлений в пласте, а также построим индикаторные диаграммы $Q_1 = f(\Delta p^2)$ притока газа к забою скважины для различных газоконденсатных факторов, при следующих условиях ¹:

$$\begin{aligned} p_1 &= 370 \text{ атм}, & R_2 &= 1000 \text{ м} \\ 2R_0 &= 8'' = 20 \text{ см}, & h &= 23 \text{ м}, & k &= 0.02 \text{ дарси} \\ \mu_1 &= 0.028 \text{ сн}, & \mu_2 &= 0.75 \text{ сн}, & \rho &= 0.07207 \cdot 10^{-8} \text{ кгсек}^2/\text{см}^4 \end{aligned}$$

Для газоконденсатных факторов примем следующие значения:

$$\begin{aligned} \Gamma &= 7500, 8000, 9000, 10000 \\ &12000, 15000, 20000, 30000 \text{ м}^3/\text{м}^3 \end{aligned}$$

Пластовое давление и давление начала конденсации приняты равными. Согласно исследованиям [2] величина A принимается равной $0.474577 \cdot 10^{-6} \text{ 1/атм}$.

Для относительных фазовых проницаемостей $k_1(s)$ и $k_2(s)$ принимаем

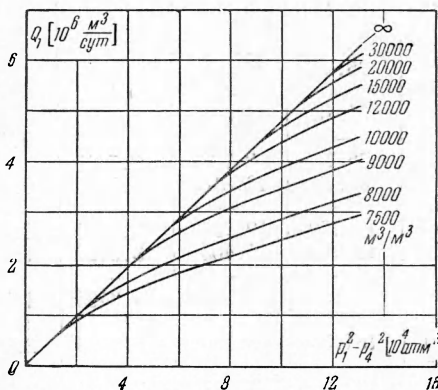
$$k_1(s) = 1.0908 - 1.51515s, \quad k_2(s) = -0.0857143 + 0.42858s$$

Произведенная замена кривых фазовых проницаемостей прямыми даст погрешность не более 20%.

На фиг. 1 представлен график зависимости p_3 от Γ , построенный по формуле (8). По этому графику можно определить для данных примеров давления на границе областей. В таблице приведены значения R_1 в зависимости от p_4 и Γ .

На фиг. 2 построены кривые распределения давления для значений $\Gamma = 7500 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и $\Gamma = \infty$ при $p_1 = 75 \text{ атм}$.

На фиг. 3 приведены рассчитанные вышеприведенным методом индикаторные диаграммы зависимости дебита газа $Q_1 = Q_1(\Delta p^2)$.



Фиг. 3

¹ Числовые данные взяты близкими к данным одного из газоконденсатных месторождений Азербайджана.

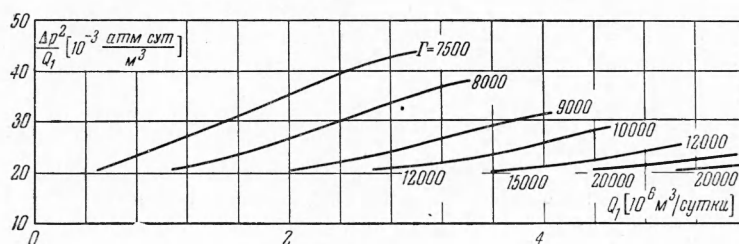
Значения R_1 в м

p_4 , атм	Γ , м ³ /м ³							
	7500	8000	9000	10 000	12 000	15 000	20 000	30 000
356	0.1							
340	5.5							
338	—	0.1						
320	25.69	1.2485						
309	—	—	0.1					
300	51.10	4.323	—					
285	—	—	—	0.1				
280	76.75	8.7632	0.7413	—				
260	99.73	13.816	1.5116	0.4000				
250	—	—	—	—	0.1			
240	120.00	19.125	2.4585	0.7100	0.155			
220	138.68	24.405	3.5120	1.1100	0.2898			
215	—	—	—	—	—	0.1		
200	154.50	29.51	4.6465	1.55	0.4497	0.150		
180	168.60	34.36	5.7352	2.07	0.6255	0.230	0.1	
160	181.35	38.90	6.8339	2.46	0.8201	0.32	0.15	
145	—	—	—	—	—	—	—	0.1
140	192.50	43.07	7.8984	2.91	0.9861	0.41	0.21	0.1092
120	202.20	47.012	8.9120	3.34	1.1618	0.50	0.26	0.1451
100	210.86	50.52	9.8694	3.75	1.3302	0.58	0.31	0.1788
75	222.84	54.36	10.892	4.25	1.5147	0.68	0.37	0.2172

(где $\Delta p^2 = p_1^2 - p_4^2$) для газоконденсатных смесей (газоконденсатные факторы указаны на кривых). Отметим, что $\Gamma = \infty$ соответствует движению чистого газа.

Как видно из фиг. 3, с увеличением Γ индикаторная кривая приближается к индикаторной прямой для чисто газовой скважины, что и следовало ожидать.

Из фиг. 3 следует, что с увеличением Δp^2 разность между дебитом газа при заданном газоконденсатном факторе и $\Gamma = \infty$ увеличивается.



Фиг. 4

Данные, приведенные на фиг. 3, указывают на необходимость учета конденсата при обработке индикаторных кривых.

Кривые, приведенные на фиг. 3, построены на фиг. 4 в координатах $\Delta p^2 / Q_1$ и Q_1 . Как видно из фиг. 4, зависимость $\Delta p^2 / Q_1 = f(Q_1)$ в первом приближении может быть принята прямолинейной.

Из фиг. 4 следует, что зависимость между Δp^2 и Q_1 приближенно выражается двухчленной формулой благодаря наличию конденсата.

Поступила 21 VII 1961

ЛИТЕРАТУРА

- Магеррамов Н. Х., Мирзаджанзаде А. Х. О фильтрации газоконденсатных смесей в пористой среде. ПММ, 1960, т. XXIV, вып. 6.
- Фарзанае Н. Г. Методика экспериментального исследования поведения газоконденсатных систем на аппаратуре РУТ. Тр. АЗИИ им. Азизбекова, Баку, 1957, вып. XIX.
- Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949.